

基于适应性权重遗传算法的多目标无功优化研究

陈得宇¹, 张仁忠¹, 沈继红², 高世伟³

(1. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 天津电力公司, 天津 300201)

摘要: 研究一种多目标无功优化问题的求解方法。基于无功分层分区平衡以及保证紧急情况下电网安全的原则, 给出了在电网正常情况下优先投切电容器、调节变压器分接头, 然后设定机端电压的优化调控顺序, 进一步提出将优化问题分解为连续变量优化和离散变量优化问题, 并分别求解, 迭代直至收敛的求解思路。鉴于多目标无功优化模型的复杂性, 以及连续、离散控制变量并存, 采用遗传算法求解, 重点研究了控制变量的编码方案以及选择、交叉、变异以及保留操作策略。针对于多目标无功优化各个目标权重难以确定问题, 又进一步引入了适应性权重遗传算法, 随着遗传代数的进化算法能自适应地给出各个目标权重。仿真算例验证了文中所提的多目标无功优化求解方法的合理性。

关键词: 多目标无功优化; 电容器投切; 变压器分接头调节; 机端电压设定; 适应性权重遗传算法

Study on multi-objective reactive power optimization based on genetic algorithm with adaptive weight

CHEN De-yu¹, ZHANG Ren-zhong¹, SHEN Ji-hong², GAO Shi-wei³

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300201, China)

Abstract: The solution for multi-objective reactive power optimization is studied. Based on the principle of hierarchical and regional balance of reactive power and guarantee for power system stability in emergency cases, regulation order is confirmed, that capacitor switching and transformer tap adjusting are first, and generator terminal voltage setting follows. Furthermore, the solving thinking is presented, that optimization problem is decomposed into continuous variable optimization and discrete variable optimization, then they are solved respectively and cross iteration until convergence. In view of the optimization complexity and the coexistence of discrete variables and continuous variables, genetic algorithm is presented for finding global optimal solution. The coding of control variables and strategies for the selection, cross, mutation and retention operation are mainly studied. Aiming at determining each objective weight of multi-objective optimization, the genetic algorithm with adaptive weight is introduced further, with genetic evolution each objective weight is given adaptively by the algorithm. Case studies show that the proposed thinking and algorithm for solving multi-objective reactive power optimization are reasonable.

Key words: multi-objective reactive power optimization; capacitor switching; transformer tap adjusting; generator terminal voltage setting; genetic algorithm with adaptive weight

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0001-07

0 引言

合理地进行发电机机端电压设定、电容器投切以及变压器分接头调节, 达到降低电网线损, 提高电压质量以及电压稳定等目标, 此优化问题为多目标无功优化。它的难点是离散和连续控制变量共存, 且优化模型较复杂, 优化的目标是多目标, 业内针对于此问题的求解做了大量研究工作。

针对于无功优化存在的离散控制变量, 文献[1]提出了一种内点分支定界法来求解, 采用内点法寻

优, 结合广度优先遍历的分支定界法对离散变量进行归整处理, 以找到更合理的最优解; 文献[2]提出在牛顿最优潮流中用正曲率二次罚函数来处理离散变量; 文献[3]对罚函数处理离散变量的原理以及如何与原对偶内点法直接结合进行了详细论述, 给出了一种求解含离散控制变量的大规模电力系统无功优化的新算法; 以上方法不足是很难以较大概率收敛到全局最优解。而模拟退火法^[4]、Tabu 搜索法^[5]以及遗传算法(GA)^[6-8]等现代优化技术以其随机寻优的策略, 从原理上能保证以更大的概率收敛到全

局最优解,而且易于处理离散控制变量,其中尤以遗传算法用于无功优化备受关注。文献[6]详细阐述了GA在电力系统无功优化中的应用,计算实例表明,GA以其收敛性好、全局寻优能力强等优点成为了无功优化求解的一种较好方法;文献[7]采用并行遗传算法提高优化求解效率;文献[8]将GA与内点法结合起来求解无功优化,发挥了各自的优势。在多目标无功优化建模以及求解方面也做了一定工作,文献[9]将表征电压稳定的负荷裕度作为优化目标引入,构造了全面的多目标优化模型,包括线损、电压质量和电压安全性。文献[10]提出了多目标优化模型,并用预测-校正原内点法来求解。多目标无功优化的研究虽取得了一定成果,但为了更好地解决此问题还需更深入地研究与探讨。

本文研究了基于适应性权重遗传算法的多目标无功优化问题。首先,针对机端电压设定、电容器投切以及变压器分接头调节等多种手段的调控顺序做了研究;然后,引入了适应性权重的遗传算法来求解,对控制变量的编码以及选择、交叉、变异、保留等基本操作进行了探讨;对多目标优化各个目标权重的设定问题,结合遗传算法特点,给出了随着代数进化,适应性确定权重的策略;最终,仿真算例验证了本文所提求解算法以及思路的合理性。

1 多目标无功优化模型

$$\min F = \min(F_1, F_2, F_3) = \quad (1)$$

$$\min \left(P_{\text{loss}}(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}), -M(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}), \sum_{i=1}^n (V_i(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}) - V_c)^2 \right)$$

s.t.

$$f(\theta, \mathbf{V}_l, \mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}) = 0$$

$$\underline{V}_l \leq V_l \leq \bar{V}_l$$

$$\underline{V}_g \leq V_g \leq \bar{V}_g$$

$$\underline{QG} \leq QG \leq \bar{QG}$$

$$\underline{c}_j \leq c_j \leq \bar{c}_j$$

$$\underline{b}_t \leq b_t \leq \bar{b}_t$$

式中: F 为多目标,优化目标可表示为 $\min(F_1, F_2, F_3)$,分别表示降低线损、提高电压稳定性和改善电压质量,其中, $F_1=P_{\text{loss}}(\cdot)$ 为线损; $M(\cdot)$ 为连续潮流计算得到的表征电网静态电压稳定性的负荷裕度, $F_2=-M(\cdot)$; $(V_i(\cdot)-V_c)^2$ 表征为节点 i 的电压质量; F_3 即为电网所有节点的电压质量和; \mathbf{V}_g 为发电机节点(包括PV节点和平衡节点)设定的机端电压幅值; \mathbf{c} 为投切电容器的等效电纳; \mathbf{b} 为调节变压器的分接头变比; \mathbf{V}_g 、 \mathbf{c} 、 \mathbf{b} 三者为控制变量; $f(\cdot)$ 为潮流等式约束; θ 为所有节点电压的相角; \mathbf{V}_l 为负荷节点电

压幅值; \bar{V}_l 和 \underline{V}_l 分别是负荷节点电压的上、下限,给定为1.05和0.95; \bar{V}_g 和 \underline{V}_g 分别为发电机节点电压的上、下限,给定为1.1和0.9; QG 是发电机的无功输出; \bar{QG} 和 \underline{QG} 分别为发电机无功的上、下限; \bar{c}_j 和 \underline{c}_j 分别是可供投切电容器等效电纳的上、下限; \bar{b}_t 和 \underline{b}_t 分别是可供调节变压器变比的上、下限。

求解综合优化模型(1)的难点:1)从优化目标,等式以及不等式约束,还有控制变量等来看,优化模型(1)从数学上来说说是复杂优化问题,能否基于电力系统物理问题实际,来简化此模型求解;2)电容器投切 \mathbf{c} 和变压器分接头调节 \mathbf{b} 都为离散控制变量,而机端电压设定 \mathbf{V}_g 为连续控制变量,此优化为离散和连续控制变量混合的优化,需合适的求解算法;3)这是一多目标优化问题,如何来合理地确定各目标权重。

2 连续与离散变量的协调调控

为了满足无功分层分区、就地平衡的原则,应优先动作变电站内的离散控制设备:投切电容器和调整变压器分接头,在此基础上再进行连续控制设备的调节,即发电机机端电压的设定(无功输出)。

当危及系统安全的故障发生时,由于离散控制设备单台可调节容量较小、响应动作时间慢,要使系统快速恢复到安全,更多地依赖响应速度快、可调节容量大的发电机来调节。所以,从提高系统安全性角度来讲,在正常情况下也应该优先动作离散控制设备,为发电机响应安全事件留出较大的调节裕度。

综合上述两个原因,离散控制设备应优先于连续控制设备动作。进一步,提出如下的离散控制变量优化和连续控制变量优化交叉迭代求解的思路:

1)将连续控制变量:发电机机端电压设置为额定电压值1,即 $\mathbf{V}_g(0)=1$;设定优化迭代次数 $k=1$;

2)将 $\mathbf{V}_g(k-1)$ 代入优化模型(1),只考虑离散变量:电容器 $\mathbf{c}(k)$ 和变压器变比为控制变量 $\mathbf{b}(k)$,定义此模型为离散变量优化模型(1.1);求解优化模型(1.1),得到第 k 次迭代的离散控制变量优化解 $\mathbf{c}(k)$ 、 $\mathbf{b}(k)$;

3)将 $\mathbf{c}(k)$ 、 $\mathbf{b}(k)$ 代入优化模型(1),只有连续变量 \mathbf{V}_g :机端电压为控制变量,定义此模型为连续变量优化模型(1.2),求解此优化模型,得到连续控制变量 $\mathbf{V}_g(k)$;

4) 如果 $k > 1$, 且满足 $\max(|V_g(k) - V_g(k-1)|) < \varepsilon_c$, $\max(|c(k) - c(k-1)|) < \varepsilon_c$, $\max(|b(k) - b(k-1)|) < \varepsilon_b$, 则退出迭代, 优化解为 $V_g(k)$, $c(k)$, $b(k)$; 否则当 $k > 1$, 且上述任意 $\max(\cdot) < \varepsilon$ 中有不成立的, 则继续下一步;

5) 优化迭代次数 $k=k+1$, 转向步骤 2)。

3 基于适应性权重遗传算法的求解

遗传算法宜处理优化模型较复杂, 且控制变量含离散变量的优化问题的求解, 更可能从全局角度寻优。

3.1 控制变量的编码

采用二进制编码, 设整数变量区间为 $[a, b]$, 区间长度为 $b-a$, 将此区间分为 $b-a$ 等份:

$$2^{k-1} < b-a \leq 2^k \quad (2)$$

这样编码的二进制串长至少需要 k 位。

k 位二进制串 $(b_{k-1}b_{k-2} \cdots b_0)$ 转化为 $[a, b]$ 区间内对应的整数分为如下两步:

1) 将此二进制串代表的二进制数化为 10 进制数:

$$(b_{k-1}b_{k-2} \cdots b_0)_2 = \left(\sum_{j=0}^{k-1} b_j \cdot 2^j\right)_{10} = i' \quad (3)$$

2) i' 对应的区间 $[a, b]$ 内的整数 i :

$$i = a + \text{int}\left(i' \cdot \frac{b-a}{2^k - 1}\right) \quad (4)$$

3.1.1 机端电压的编码方案

求解连续变量优化模型 (1.2), 对其中的控制变量 V_g 进行编码。 \bar{V}_g 和 \underline{V}_g 分别为 1.1 和 0.9, 且设可调节的步长为 0.01, 则有 $(1.1-0.9)/0.01=20$, $2^4 < 20-0 < 2^5$, 所以对于一台发电机机端电压二进制的编码位数为 5 位, 当有 n 台发电机机端电压可调时, 则编码位数为 $5 \times n$ 。机端电压编码方案如下:

$V_{n,4}V_{n,3}V_{n,2}V_{n,1}V_{n,0} | V_{n-1,4}V_{n-1,3} \cdots V_{n-1,0} | \cdots | V_{1,4}V_{1,3}V_{1,2}V_{1,1}V_{1,0}$ 其

中的 $(V_{n,4}V_{n,3}V_{n,2}V_{n,1}V_{n,0})$ 代表一台发电机机端电压的二进制编码, 且 $V=0$ 或 1, 通过式 (3)、(4) 将二进制编码还原为发电机机端电压设定值:

$$(V_4V_3V_2V_1V_0)_2 = \left(\sum_{j=0}^4 V_j \cdot 2^j\right)_{10} = i', \text{ 且}$$

$$i = 0 + \text{int}\left(i' \cdot \frac{20-0}{2^5 - 1}\right)$$

则有发电机机端电压为:

$$V_g = 0.9 + i \times 0.01$$

此发电机机端电压编码方案同时也隐含了机端电压不等式约束 $\underline{V}_g \leq V_g \leq \bar{V}_g$ 。

3.1.2 电容器投切的编码方案

求解离散变量优化模型 (1.1), 对其中的控制变量之一电容器投切进行编码。设节点 $i_j (j=1, 2, \cdots, n)$ 处配置电容器, 在节点 i_j 处的单位电容器组等效电纳为 $c_{e,j}$, 电容器组的容量范围为 $[\underline{c}_j, \bar{c}_j]$, 如此, 得到待投切电容器组数的整数范围区间 $[\underline{z}_{c,j}, \bar{z}_{c,j}]$ 。一般假设 $\underline{z}_{c,j}=0$ 。

由式 (2) 有:

$$2^{k_j-1} < \bar{z}_{c,j} - 0 \leq 2^{k_j}$$

则在 i_j 节点电容器编码所需的二进制串长度为 $k_j (j=1, 2, \cdots, n)$ 。

在 n 个节点处投切电容器组数的编码方案为:

$c_{n,k_n-1}c_{n,k_n-2} \cdots c_{n,0} | c_{n-1,k_{n-1}-1}c_{n-1,k_{n-1}-2} \cdots c_{n-1,0} | \cdots | c_{1,k_1-1}c_{1,k_1-2} \cdots c_{1,0}$, 其中 c 是 0、1 的二进制数。

由式 (3)、(4) 可从左至右依次求得 i_j 节点处投切的电容器组数 $z_j (j=n, n-1, \cdots, 1)$, 再结合单位电容器组等效电纳为 $c_{e,j}$, 即可得到投切的电容器电纳值 c_j 。此电容器编码方案同时也隐含了电容器的不等式约束 $\underline{c}_j \leq c_j \leq \bar{c}_j$ 。

3.1.3 变压器变比的编码方案

求解离散变量优化模型 (1.1), 对其中的控制变量之一变压器变比进行编码。与式 (2) 电容器投切编码思路类似, 可得到变压器分接头档位的编码方案为:

$$b_{n,k_n-1}b_{n,k_n-2} \cdots b_{n,0} | b_{n-1,k_{n-1}-1}b_{n-1,k_{n-1}-2} \cdots b_{n-1,0} | \cdots | b_{1,k_1-1}b_{1,k_1-2} \cdots b_{1,0}$$

其中: b 是 0、1 的二进制数。由式 (3)、(4) 可从左至右依次求得各个可调节变压器分接头档位 $z_t (t=n, n-1, \cdots, 1)$, 再结合档位变比步长 $b_{e,t}$, 即可得到各个变压器的变比 b_t 。此变压器档位编码方案同时也隐含了变压器变比不等式约束 $\underline{b}_t \leq b_t \leq \bar{b}_t$ 。

3.1.4 电容器投切和变压器变比的综合编码方案

离散变量优化模型 (1.1) 含有电容器和变压器分接头两类离散控制变量, 所以综合式 (2)、(3) 的编码方案得到求解优化模型 (1.1) 的电容器投切和变压器分接头调节的综合编码方案:

$b_{n,k_n-1}b_{n,k_n-2} \cdots b_{n,0} | b_{n-1,k_{n-1}-1}b_{n-1,k_{n-1}-2} \cdots b_{n-1,0} | \cdots | b_{1,k_1-1}b_{1,k_1-2} \cdots b_{1,0} | c_{n,k_n-1}c_{n,k_n-2} \cdots c_{n,0} | c_{n-1,k_{n-1}-1}c_{n-1,k_{n-1}-2} \cdots c_{n-1,0} | \cdots | c_{1,k_1-1}c_{1,k_1-2} \cdots c_{1,0}$
可简写为:

$$B_n B_{n-1} \cdots B_1 \parallel C_n C_{n-1} \cdots C_1$$

3.2 适应度函数

由第2节可知：优化模型(1)的求解可分解为离散控制优化模型(1.1)、连续变量优化模型(1.2)的分别求解，并且交叉迭代直至收敛。无论优化模型(1.1)还是(1.2)，都是一多目标优化，将最小化3个目标 F_1 、 F_2 、 F_3 添加负号，变为最大化3个目标，分别定义为 Z_{F1} 、 Z_{F2} 和 Z_{F3} ：

$$Z_{F1}(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}) = \max(-F_1)$$

$$Z_{F2}(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}) = \max(-F_2)$$

$$Z_{F3}(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}) = \max(-F_3)$$

对于遗传进化的每一代种群个体，二进制编码解码得到控制变量 $\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}$ ，潮流计算后可求得优化目标：线损 F_1 ，电压质量 F_3 ；以当前潮流计算结果为基态点，定义系统基态负荷为 L_0 ，设定负荷变化方向和响应负荷变化的发电计划模式，利用连续潮流计算得到电压崩溃点，定义系统崩溃点负荷为 L^* ，优化目标 F_2 为负荷裕度 M ，则 $M=L^*-L_0$ 。对应进化种群中每个个体的各个优化目标值得到。

更为关键的是如何确定多目标优化中各个目标的权重系数。本文采用文献[11]提出的适应性权重遗传算法来求解多目标优化，利用遗传算法的特点与优势，随着代数进化，不断改变权重系数，给出适应性确定权重的策略。

遗传进化中，每代产生一定数目个体组成种群 P 。当前种群所有个体优化目标 Z_{F1} 的最大值和最小值分别为：

$$z_{F1}^{\max} = \max\{-F_1(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) | \mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j \in P\}$$

$$z_{F1}^{\min} = \min\{-F_1(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) | \mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j \in P\}$$

式中： $\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j$ 是种群中任意个体 j 的编码方案所对应的机端电压设定值、电容器投切量、变压器变比。

类似可得到 z_{F2}^{\max} 、 z_{F2}^{\min} 以及 z_{F3}^{\max} 、 z_{F3}^{\min} 。

在当前代，每个目标的适应性权重用下式表示：

$$w_k = \frac{1}{z_{Fk}^{\max} - z_{Fk}^{\min}}, k = 1, 2, 3$$

对于种群 P 给定个体 j 对应的 $\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j$ ，有：

$$z_{F1} = F_1(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j)$$

$$z_{F2} = F_2(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j)$$

$$z_{F3} = F_3(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j)$$

适应性权重的多目标优化的目标函数：

$$z(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) = \sum_{k=1}^3 w_k (z_{Fk} - z_{Fk}^{\min}) \quad (5)$$

在文献[11]中已有论述，如此适应性确定多目标权重的方法，可将多目标优化常见的产生式求解思路和启发式决策思路的优点集于一体，在进化过程中根据当前种群一些有用的信息对目标偏好进行持续的细化，适应性调整权重以获得朝正向理想点的搜索压力，不同于传统的固定权重的多目标优化。

不等式约束通过适应性罚函数给出，如：

$$I_l \leq I_{l,\max}$$

$$|V_i| \leq V_{\max} \text{ or } |V_i| \leq -V_{\min} \quad (6)$$

约束式(6)可统一计作 $g_i(\mathbf{V}_g, \mathbf{c}, \mathbf{b}) \leq b_i, i=1, 2, \dots, M$ 。

对于个体 $\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j$ ，适应性罚函数为：

$$p(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\Delta b_i(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j)}{\Delta b_i^{\max}} \right) \quad (7)$$

式中：

$$\Delta b_i(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) = \max\{0, g_i(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) - b_i\}$$

$$\Delta b_i^{\max} = \max\{\varepsilon, \Delta b_i(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) | \mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j \in P\}$$

$\Delta b_i(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j)$ 是个体 $\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j$ 对第 i 个约束的违背值； Δb_i^{\max} 是当前种群中所有个体对约束 i 的最大违背值； ε 是一个小正数，用来避免罚函数中出现被零除的情况。

综合式(5)、(7)，对于个体 $\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j$ ，带有罚函数的适应度函数为：

$$Fit(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) = z(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) p(\mathbf{V}_{g,j}, \mathbf{c}_j, \mathbf{b}_j) \quad (8)$$

3.3 其它基本操作策略和有关参数的设置

1) 选择操作：它模拟了生物进化过程中自然选择的规律，此操作决定适应度函数值越大的个体被选中的机会越多，从而使得优良特性得以遗传，体现了自然界中适者生存的道理。本文采用较成熟的轮盘赌方法。

2) 交叉操作：它是将两个染色体重新组合的操作。此操作可产生新的个体，交叉体现了自然界中交换信息的思想。本文采用多点交叉方法，且离散控制变量综合编码的S编码和C编码各自分别进行交叉操作。

3) 变异操作：它模拟了生物进化过程中偶然的基因突变现象，变异能增加群体中个体多样性。本文采用一点按位变异操作，以给定的变异率随机选择一个已经进行选择操作的染色体作为父本，再随机选择该个体的某二进制位进行“0”变“1”，“1”变“0”的操作，形成一个新的染色体。

4) 保留操作：此操作能保证遗传优化以更大的概率收敛到全局最优解。完成选择，交叉以及变异操作后，根据给定的保留率，将上一代中若干最优

(或次最优)个体直接复制到本代,随机替换本种群中某些个体,以保证本代的最优(或次最优)个体至少不会比上一代差。

把适应性权重遗传算法用于多目标无功优化求解前,需设定遗传算法参数,如种群的规模、选择率、交叉率、变异率以及保留率等,它们的设定对优化最终结果是有影响的。

这其中以交叉率以及变异率的设定更为重要,本文采用一种自适应的交叉率和变异率的设定,使优化能以较快的速度、更大的概率趋于全局收敛。在遗传进化初期,交叉率应设定较大,变异率应较小,以确保计算过程的平稳进行。在进化后期,种群中的染色体已趋于稳定,可能收敛于局部最优解,此时交叉率发生概率可降低,而变异率应设定大一些,以便有机会跳出局部最优解。自适应的交叉率和变异率的计算公式为:

$$P_c^{(k)} = P_c^{(0)} - (P_c^{(0)} - P_{c,\min}) \exp(-\Delta u / N_c) \quad (9)$$

$$P_m^{(k)} = P_m^{(0)} - (P_m^{(0)} - P_{m,\max}) \exp(-\Delta u / N_m) \quad (10)$$

式中: k 为遗传进化代数; Δu 为第 $k-1$ 次进化代时种群中所包含染色体的适应度函数最大值和最小值之差; $P_c^{(0)}$ 、 $P_c^{(k)}$ 、 $P_m^{(0)}$ 、 $P_m^{(k)}$ 分别表示交叉率、变异率的初始值和第 k 次进化代时的数值,初始值取 $P_c^{(0)} = 0.9$, $P_m^{(0)} = 0.001$; $P_{c,\min}$ 、 $P_{m,\max}$ 分别为交叉率的最小值和变异率的最大值,可分别取 0.6, 0.1。 N_c 、 N_m 为给定常数,用于模拟交叉率、变异率随适应度函数分散情况而变化的快慢程度,可取 $N_c=N_m=20$ 。式(9)、(10)表示交叉率和变异率随种群中染色体适应度函数值分散程度而变化,分散程度变小,交叉率变小,而变异率变大。

而种群规模大小、选择率、保留率等的设定结合如下具体的仿真算例给出。

4 仿真算例

4.1 IEEE30 节点算例

采用 IEEE30 节点标准算例进行本文所提求解算法以及思路的仿真验证,标准算例数据参见文献[12]。C++语言编写了此研究相关的算法程序。

表 1 给出了优化前的网络线损、电压质量以及负荷裕度目标值。

表 1 优化前各优化目标值
Tab.1 Optimal objectives before optimization

优化目标	计算值/p.u.
线损	0.074 3
电压质量	0.018 44
负荷裕度	6.168 59

采用连续变量优化模型和离散变量优化模型分别求解,两模型交叉迭代优化,直至收敛,得到最优控制解。表 2 列出了连续控制变量和离散控制变量编码方案。

表 2 控制变量编码
Tab.2 Coding of control variables

	调节步长	下限	上限	单台编码长度	总长度
发电机	0.01	0.90	1.10	5	5×6=30
变压器	0.02	0.90	1.10	4	4×4=16
电容器 1	0.01	0.00	0.20	5	5
电容器 2	0.01	0.00	0.10	4	4
连续变量编码长度	30				
离散变量编码长度	25				

经过多次运算,得到遗传算法寻优性能较优的参数设定值,其中种群规模大小为 60,而选择率设定为 0.6,保留率设定为 0.05~0.1,变异率和交叉率如前所述,自适应给定。表 3 给出遗传算法算例计算时间耗费、以及迭代次数等信息。

表 3 遗传算法时间耗费、迭代次数的统计
Tab.3 Statistic for time consuming and iteration number of genetic solution algorithm

连续变量优化时间耗费(1次)	12 m
离散变量优化时间耗费(1次)	10 m
迭代次数	5次
总的时间耗费	22×5=110 m

经过 5 次离散变量和连续变量的迭代优化,收敛得到最优解,表 4 给出控制变量的最优解结果。

表 4 控制变量的最优解

Tab.4 Optimal solution of control variables

发电机	节点电压	变压器	变比	电容器	电纳
1	1.06	9-6	1.00	10	0.20
2	1.05	6-10	0.96	24	0.08
5	0.99	12-4	1.04		
8	1.02	28-27	0.94		
11	1.08				
13	1.02				

优化后各优化目标值和优化前表 1 各目标值相比,有了较大改善,见表 5。

表 5 优化后各优化目标值
Tab.5 Optimal objectives after optimization

优化目标	计算值/p.u.
线损	0.0718
电压质量	0.005 06
负荷裕度	6.330 67

而图 1 的(a)、(b)、(c)分别是优化过程中，随着迭代次数的增加，目标逼近最优值的过程。

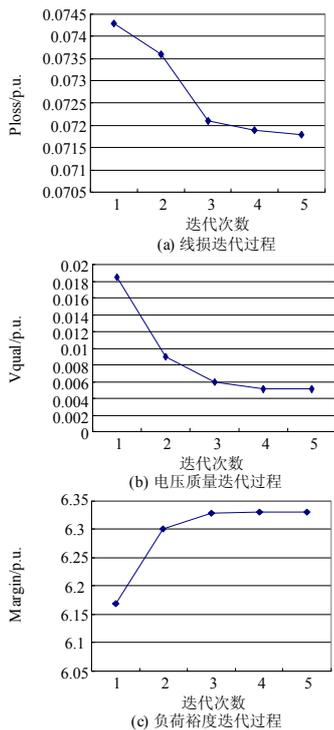


图 1 优化求解的迭代过程

Fig.1 Iteration process of solving for reactive power optimization

4.2 IEEE118 节点算例

为了对本文所提求解思路的优缺点有更全面的了解，再进一步应用 IEEE118 节点进行仿真与验证。IEEE118 节点系统参数见文献[13]，其中，发电机 54 台，可调变压器 9 台，可投切电容器 14 台，它们为控制变量。限于篇幅，如表 6~8 只是给出优化计算部分结果：如控制变量编码、控制变量优化解、优化目标解，同时表 9 给出 IEEE118 节点遗传优化的时间耗费。

表 6 中各发电机、变压器编码相同，而电容器由于上、下限，以及单位调节容量不同，各电容器编码各异，限于篇幅表中只列出部分电容器的编码。连续变量、离散变量编码总长度分别合计为 270、

104，是 IEEE30 节点相应编码长度的 9 倍、4.16 倍。

表 6 IEEE118 控制变量编码
Tab.6 Coding of control variables of IEEE 118

	调节步长	下限	上限	单台编码长度	总长度(台数*每台编码长度)
发电机	0.005	0.95	1.05	5	54×5=270
变压器	0.02	0.90	1.10	4	9×4=36
电容器 (节点 5)	0.02	-0.60	0.40	6	68
电容器 (节点 34)	0.01	0.00	0.25	5	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
电容器 (节点 110)	0.01	0.00	0.18	5	
连续变量编码长度	270				
离散变量编码长度	36+68=104				

表 7 中除了列出全部变压器变比的优化解，限于篇幅，只列出了部分发电机机端电压设定、电容器投切的优化解。

表 7 IEEE118 控制变量的最优解
Tab.7 Optimal solution of control variables of IEEE 118

发电	节点	发电	节点	变压	变比	电容	电纳
机	电压	机	电压	器		器	
1	1.02	4	1.05	5-8	1.00	5	0.4
6	1.04	12	1.04	25-26	1.06	34	0.21
15	1.035	27	1.035	17-30	0.98	45	0.15
32	1.035	40	1.025	37-38	0.98	48	0.09
19	1.035	65	1.05	59-63	0.96	82	0.3
77	1.04	90	1.03	61-64	1.00	105	0.3
104	1.025	112	1.045	65-66	0.98	110	0.18
55	1.03	100	1.03	69-68	1.04	⋮	⋮
⋮	⋮	73	1.02	80-81	1.02	44	0.08

表 8 IEEE118 节点优化前、后各优化目标值
Tab.8 Optimal objectives before optimization and after optimization of IEEE 118

优化目标	优化前/p.u.	优化后/p.u.
线损	1.325 2	1.160 3
电压质量	0.166 4	0.086 0
负荷裕度	0.115 7	0.157 2

从表 8 可看出, 经过本文所提遗传算法的优化, 线损、电压质量以及负荷裕度三个优化目标值较优化前有较好效果。

表 9 IEEE118 节点遗传优化算法时间耗费、迭代次数的统计

Tab.9 Statistic for time consuming and iteration number of genetic solution algorithm of IEEE 118

连续变量优化时间耗费(1次)	72 m
离散变量优化时间耗费(1次)	32 m
迭代次数	5次
总的时间耗费	104×5=520 m

遗传算法交叉率、变异率自适应确定, 而其余参数, 如种群规模、选择率、保留率等同 IEEE30 节点的设置。从表 9 可看出, 随着系统规模的扩大, 控制变量增加, 相应地遗传进化每一代个体的编码长度也加长, 则交叉操作、解码以及求解适应度函数的潮流计算、连续潮流计算等时间耗费都会增加。

4.3 算例总结

从以上两个算例对比可看出, 遗传算法固然具有多点随机搜索的全局寻优能力, 但代价是计算效率较低, 且随着电网规模的增大, 此不足更明显。日后的研究将集中于提高优化算法效率: 如遗传算法中离散变量和连续变量并行优化; 如连续变量优化可考虑采用效率更高的内点法, 而遗传算法只用于离散变量优化等。

5 结论

本文提出了基于适应性权重遗传算法求解多目标无功优化的思路。研究得到离散控制变量和连续控制变量协调调控的顺序, 将原优化模型分解为离散变量优化模型、连续变量优化模型, 两个模型分别求解并交叉迭代, 直至得到优化解。提出了用遗传算法来求解, 并研究了求解此优化问题的遗传算法编码、以及选择、交叉、变异、保留等操作的策略, 给出了遗传进化过程中多目标权重自适应确定的方法, 用 C++语言编写了求解算法程序, IEEE30 节点、IEEE118 节点仿真算例验证了本文所提求解算法和思想用于多目标无功优化的合理性。

参考文献

[1] 石韦, 韦化, 白晓清. 含离散变量的大规模电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3):41-45.
SHI Wei, WEI Hua, BAI Xiao-qing. Reactive Power Optimization in Large-scale Power Systems with Discrete Variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3):41-45.

- [2] 赵晋泉, 侯志俭, 吴际舜. 牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23):37-40.
ZHAO Jin-quan, HOU Zhi-jian, WU Ji-shun. A Novel Quadratic Penalty Function Based Discretization Algorithm for Newton Optimal Power Flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23):37-40.
- [3] 程莹, 刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5):54-60.
CHENG Ying, LIU Ming-bo. Reactive-power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5):54-60.
- [4] Hsiao Y T, Liu C C, Chiang H D, et al. A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3):988-996.
- [5] 张学松, 柳焯, 于尔铿. 基于 Tabu 方法的配电电容器投切策略[J]. 电网技术, 1998, 22(2):33-36.
ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng. The Strategy of Distribution Capacitor Scheme Based on Tabu Search[J]. Power System Technology, 1998, 22(2):33-36.
- [6] 周双喜, 杨彬. 实现无功优化的新算法—遗传算法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11):19-23.
ZHOU Shuang-xi, YANG Bin. A New Algorithm for Reactive Power Optimization-genetic Algorithms[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11):19-23.
- [7] Soto J R O, Domellas C R R, Falcao D M. Optimal Reactive Power Dispatch Using a Hybrid Formulation: Genetic Algorithms and Interior Point[A]. in: IEEE Porto Power Tech Proceedings[C]. Porto(Portugal): 2001.5-9.
- [8] 潘哲龙, 张伯明, 孙宏斌, 等. 分布计算的遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12):37-41.
PAN Zhe-long, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. A Distributed Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12):37-41.
- [9] 王勤, 方鸽飞. 考虑电压稳定性的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 31-34.
WANG Qin, FANG Ge-fei. Multi-objective Reactive Power Optimization Considering Voltage Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 23(3):31-34.
- [10] 刘雪莲, 厉吉文, 程新功, 等. 一种确定电力系统最优安全运行点的新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(8):56-60.
LIU Xue-lian, LI Ji-wen, CHENG Xin-gong, et al. A New Method to Determine Optimal Secure Operating Point of Power Systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(8):56-60.

(下转第 25 页 continued on page 25)

表 2 69 节点系统计算结果的比较

Tab.2 Result comparison of 69-node system

指标	文献[10]	本文
	10-70、12-20	10-70、12-20
断开开关	13-14、44-45	13-14、47-48
	50-51	50-51、
网损/kW	100.81	99.76
最低电压/pu	0.933	0.943

从表 1 可以看出, 对于算例 1, 用本文方法所得重构结果与文献[4]相同, 降损率达 30%, 最低点电压大幅提高, 重构效果明显。从表 2 可以看出, 对于算例 2, 用本文所提方法所得结果比文献[10]更优, 验证了本文所用方法的优越性。由于本文算法无需计算网络潮流, 经过少量简单计算即可得到重构结果, 所需时间很少, 因此适合解决大规模网络的重构问题。

4 结论

(1) 提出了阻抗距离、广义负荷、功率矩的概念, 在上述概念的基础上建立了配电网的功率矩模型。

(2) 在已有研究成果的基础上, 利用功率矩模型论述了配电网优化与功率矩均衡的关系。

(3) 以功率矩模型为基础, 提出了配电网重构的功率矩法。该方法不需计算网络潮流, 采用网络和负荷参数经过少量计算即可得到结果, 具有实用的潜力。

参考文献

- [1] FAN Ji-yuan, ZHANG Lan, Mc Donald D J. Distribution Network Reconfiguration Single loop Optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1643-1647.
- [2] Wanger T P, Chikani A Y, Hackm R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: an Application of Distribution of Distribution Automation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1922-1931.
- [3] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Refined

Branch-exchange Algorithm for Distribution Networks Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103

- [4] Goswami S K, Basu S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [5] 蔡中勤, 郭志忠, 陈学允. 配电网重构的均衡视在精确矩法[J]. 继电器, 2000, 28(12): 8-12.
CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun. Poised Apparent Accurate Moment for Network Reconfiguration in Distribution Systems[J]. Relay, 2000, 28(12): 8-12.
- [6] Kin Hoyong, Ko Yunseok, Kyung-Hee Jung. Artificial Neural-network Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1356-1366.
- [7] 韩学军, 陈鹏, 国新风, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. 电网技术, 2007, 31 (17): 60-63.
HAN Xue-jun, CHEN Peng, GUO Xin-feng, et al. A Power Flow Based Reconfiguration Method of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 60-63.
- [8] Baran M E, Wu F F. Networks Reconfiguration in Distribution Systems or Loss Reduction and Load Balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [9] Baran M E, Wu FF. Optimal Capacitor Placement on Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-732.
- [10] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.

收稿日期: 2009-04-24; 修回日期: 2009-05-12

作者简介:

董家读 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网自动化系统方面的研究工作; E-mail: 308799258@qq.com

黄庆 (1969-), 男, 工程师, 主要从事电力系统的运行工作;

黄彦全 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事继电保护和变电站综合自动化方面的研究和教学工作。

(上接第 7 页 continued from page 7)

- [11] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 于歆杰, 周根贵, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004. 76-108.
- [12] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [13] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-11-09

作者简介:

陈得宇 (1974-), 男, 博士研究生, 主要从事智能体 (Agent) 技术在电力系统中应用, 大系统建模、控制及辅助决策支持系统等研究; E-mail: chen_power@163.com

张仁忠 (1952-), 男, 教授, 研究方向为系统工程理论与应用。